

Расчёт и оптимизация параметров дискретного ПИД-регулятора методом Циглера-Николса

Воробьев В.Ю., Саблина Г.В.

ФГБОУ ВПО НГТУ, Новосибирск, Россия

Аннотация. Данная статья посвящена получению дискретных моделей непрерывных ПИД-регуляторов, а также изучению одного из методов автоматического расчета и настройки параметров регулятора – методу Циглера–Николса. Будет осуществлен расчет параметров дискретного ПИД-регулятора данным методом, а также смоделированы и оптимизированы системы с дискретными ПИД-регуляторами для объекта 3-го порядка. Моделирование будет осуществляться при помощи программной среды *Matlab* и библиотеки *Simulink*.

Ключевые слова: ПИД-регулятор, метод Циглера-Николса, оптимизация, *Matlab Simulink*, качество переходного процесса, робастность.

ВВЕДЕНИЕ

ПИД-регулятор (пропорционально-интегрально-дифференциальный) относится к наиболее распространенному типу регуляторов [1, 2]. Изобретенный еще в 1910 году, он получил своё развитие в 1980-х годах после появления микропроцессоров [3]. На текущий момент времени вероятно, около 90–95% регуляторов, находящихся в эксплуатации, используют ПИД-алгоритм. Причинами столь высокой популярности является простота построения и промышленного использования, пригодность для решения большинства практических задач и низкая стоимость. Помимо этого, было предложено множество методов для автоматического расчета и настройки параметров регулятора, таких как: метод Циглера-Николса, метод Чина-Хронеса-Ресвика и другие [4]. Большинство из этих методов применимы как к непрерывным, так и дискретным системам.

Непрерывная реализация ПИД-регулятора описывается уравнением:

$$u(t) = K \left(e(t) + 1/T_I \int_0^t e(t) dt + T_D \frac{de(t)}{dt} \right)$$

где $e(t)$ – ошибка воспроизведения входного воздействия; K , T_I , T_D – параметры ПИД-регулятора.

Дискретных реализаций непрерывного ПИД-регулятора достаточно много [5]. Так, например, если выбрать процедуру интегрирования по методу прямоугольников и первую разность для реализации процедуры дифференцирования, можно получить приближённую дискретную реализацию ПИД-регулятора:

$$u(kT) = K \left(e(kT) + \frac{1}{T_I} \sum_{i=0}^{k-1} e(iT)T + T_D \frac{e(kT) - e(kT-T)}{T} \right),$$

где k – дискретный момент времени, T – шаг дискретизации.

Рекуррентную процедуру вычисления управления [6] получим из последнего равенства:

$$u(k) = u(k-1) + q_0 e(k) + q_1 e(k-1) + q_2 e(k-2),$$

где

$$q_0 = \left(K + K \frac{T_D}{T} \right), q_1 = \left(-K + K \frac{T}{T_I} - 2K \frac{T_D}{T} \right), q_2 = K \frac{T_D}{T}.$$

Первая методика расчёта параметров регулятора была предложена учёными Циглером и Николсом в 1942 году [6]. Данная методика очень проста, но, к сожалению, не даёт наилучших результатов. Тем не менее, она до сих пор очень часто используется на практике.

Метод Циглера-Николса относится к эмпирическим методам и основан на использовании данных, полученных экспериментально в результате эксплуатации этого объекта. Заметим, что данный метод применим только для устойчивого объекта управления.

После расчёта параметров регулятора данным методом требуется его ручная подстройка для улучшения качества регулирования.

Впервые данный метод был применён для расчёта параметров регулятора для объекта, реакция которого на единичное ступенчатое воздействие показана на *Рис. 1*.

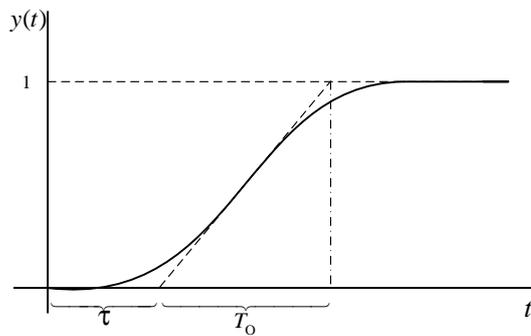


Рис. 1. Примерная переходная характеристика объекта управления

Такую характеристику обычно называют кривой разгона. Объект управления, имеющий такую переходную характеристику, представляется в виде последовательного соединения, апериодического и запаздывающего звеньев. Его передаточная функция имеет следующий вид:

$$W(p) = \frac{K_0}{T_0 p + 1} e^{-p\tau},$$

где K_0 – коэффициент передачи, T_0 – постоянная времени, характеризующая инерционные свойства объекта, τ – время запаздывания.

В Таблице 1 приведены расчётные соотношения для вычисления параметров дискретного ПИД-регулятора для данного объекта методом Циглера-Николса.

Таблица 1

	K	T/T_{II}	T_D/T
П	$\frac{T_0}{\tau+T}$	-	-
ПИ	$\frac{0.9T_0}{(\tau+T/2)} - \frac{0.135 \cdot T_0 \cdot T}{(\tau+T/2)^2}$	$\frac{0.27 \cdot T_0 \cdot T}{K_0 (\tau+T/2)^2}$	-
ПИД	$\frac{1.2 \cdot T_0}{\tau+T} - \frac{0.3 \cdot T_0 \cdot T}{(\tau+T/2)^2}$	$\frac{0.6 \cdot T_0 \cdot T}{K_0 (\tau+T/2)^2}$	$\frac{0.5 \cdot T_0}{K_0 \cdot T}$

1. РАСЧЕТ И МОДЕЛИРОВАНИЕ СИСТЕМЫ С ОБЪЕКТОМ 3-ГО ПОРЯДКА

Для исследования выберем объект 3-го порядка, передаточная функция которого имеет вид:

$$W(p) = \frac{1}{0.5p^3 + 2.5p^2 + 1.8p + 1}.$$

По переходной характеристике объекта (Рис. 2) определим время запаздывания $\tau = 0,7$ с и постоянную времени $T_0 = 4,1$ с. По Таблице 1 рассчитаем параметры K , T_D/T , T/T_{II} . Шаг дискретизации примем равным $T = 0,1$ с. Получим:

$$K = \frac{1,2T_0}{\tau+T} - \frac{0,3T_0T}{(\tau+T/2)^2} = 5,9313,$$

$$T_D/T = \frac{0,5T_0}{K_0T} = 20,5,$$

$$T/T_{II} = \frac{0,6T_0T}{K_0(\tau+T/2)^2} = 0,4373.$$

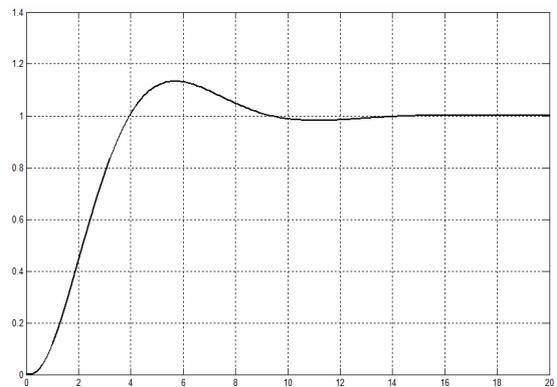


Рис. 2. Переходная характеристика объекта

По рассчитанным параметрам K , T_D/T , T/T_{II} определим коэффициенты q_i :

$$q_0 = K + K \frac{T_D}{T} = 127,523,$$

$$q_1 = -K + K \frac{T}{T_{II}} - 2K \frac{T_D}{T} = -246,5208,$$

$$q_2 = K \frac{T_D}{T} = 121,5917.$$

Теперь смоделируем систему с дискретным ПИД-регулятором, рассчитанным методом Циглера-Николса и непрерывным объектом 3-го порядка. Схема моделирования приведена на Рис. 3, а полученный переходный процесс на Рис.4.

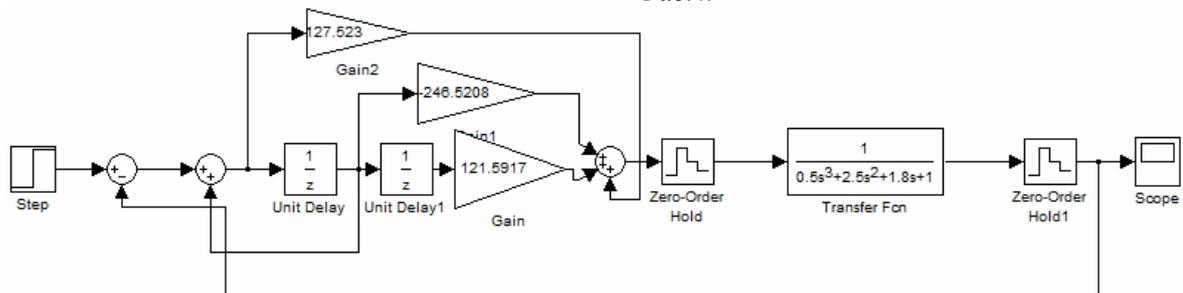


Рис. 3. Схема моделирования системы с дискретным ПИД-регулятором, рассчитанным методом Циглера-Николса, и объектом 3-го порядка

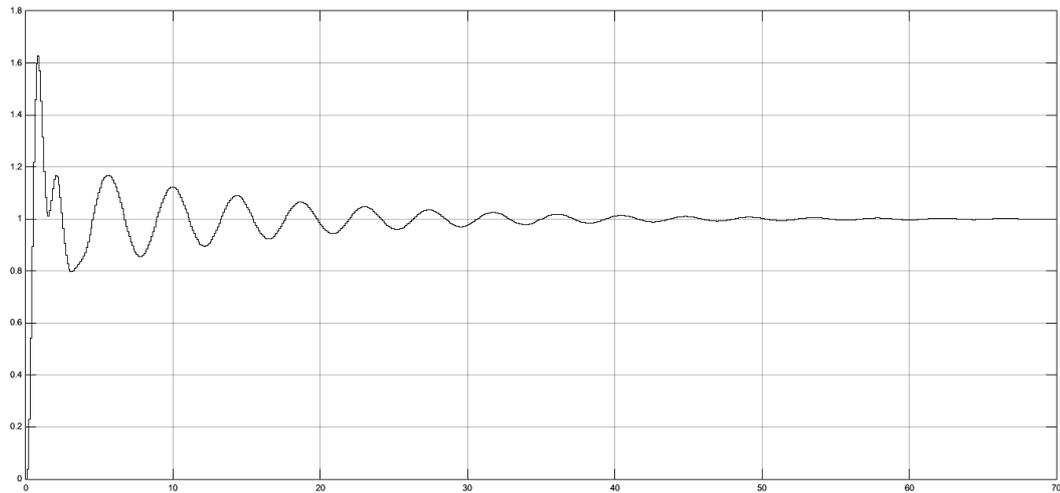


Рис. 4. Переходный процесс системы с регулятором

2. ОПТИМИЗАЦИЯ ПАРАМЕТРОВ СИСТЕМЫ

Далее произведём оптимизацию системы с дискретным ПИД-регулятором, рассчитанным методом Циглера-Николса.

Требования, предъявляемые к системе:

1. Устойчивость;
2. Требуемые критерии качества:
 - перерегулирование $\sigma \leq 40\%$;
 - длительность переходного процесса $t_{\Pi} \leq 5$ с;
 - статическая ошибка $\Delta \leq 5\%$.
3. Робастность.

Наилучший результат получился при следующих значениях коэффициентов:

$$K = 7, T / T_{II} = 0.082, T_{\Delta} / T = 10.$$

Коэффициенты q_i , рассчитанные по этим параметрам, имеют следующие значения:

$$q_0 = K + K \frac{T_{\Delta}}{T} = 77,$$

$$q_1 = -K + K \frac{T}{T_{II}} - 2K \frac{T_{\Delta}}{T} = -146,426,$$

$$q_2 = K \frac{T_{\Delta}}{T} = 70.$$

Схема моделирования системы и полученный переходный процесс представлены на Рис. 5 и 6.

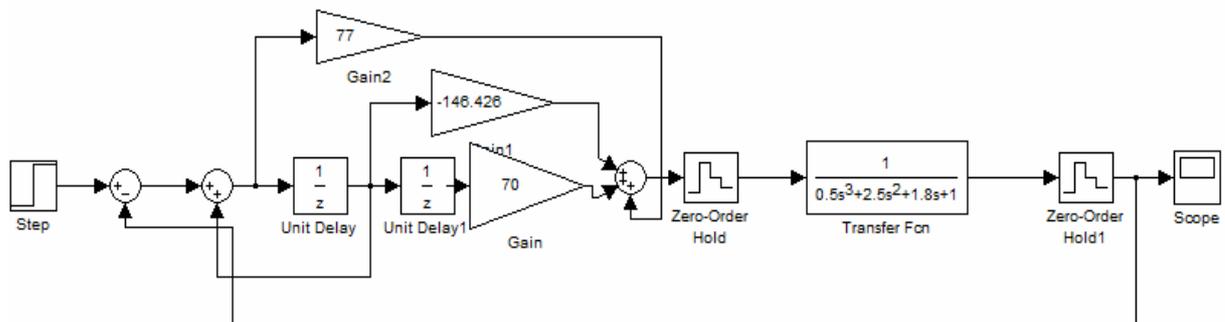


Рис. 5. Структурная схема оптимизированной системы с непрерывным объектом

По переходному процессу определим перерегулирование: $\sigma = 40\%$ и длительность переходного процесса: $t_{\Pi} = 3$ с. Видим, что при помощи оптимизации нам удалось значительно улучшить качество регулирования.

Проверим оптимизированную систему на робастность. Для этого изменим (уменьшим) каждый из коэффициентов q_i на 1%.

Коэффициенты q_i будут иметь следующие значения:

$$q_0 = 76,23, q_1 = -144,962, q_2 = 69,3.$$

Переходный процесс в системе с коэффициентами, изменёнными на 1% представлен на Рис. 7.

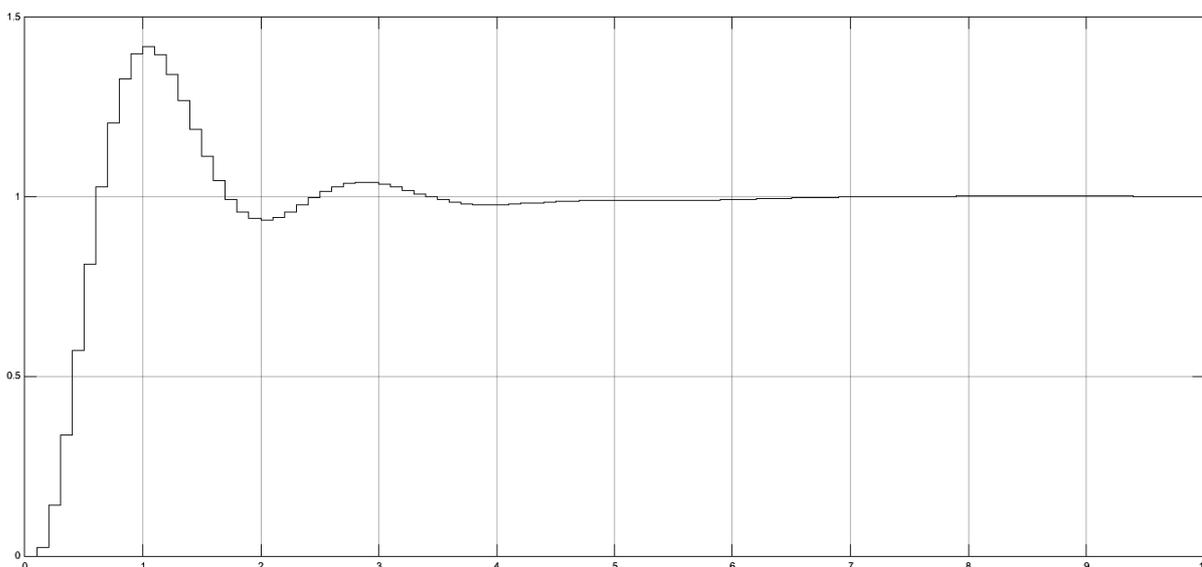


Рис. 6. Переходный процесс оптимизированной системы с непрерывным объектом

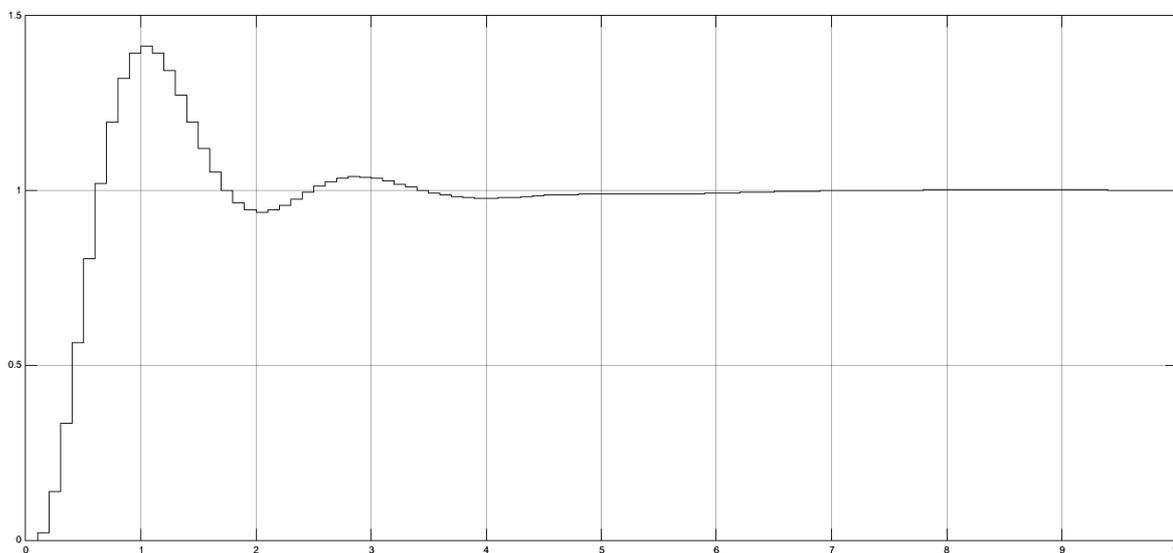


Рис.7. Переходный процесс оптимизированной системы с изменёнными на 1% коэффициентами q_i

Видим, что вид переходного процесса изменился незначительно, и система сохранила устойчивость, значит, можем сделать вывод, что система – робастная.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В ходе исследования были получены следующие основные результаты:

1. Для непрерывного объекта 3-го порядка рассчитаны параметры дискретного ПИД-регулятора методом Циглера-Николса.
2. Смоделирована система с дискретным ПИД-регулятором, рассчитанным данным методом.
3. Произведена оптимизация системы с дискретным ПИД-регулятором, получено желаемое качество переходного процесса в системе.

4. Проведена проверка оптимизированной системы на робастность путём уменьшения каждого из коэффициентов регулятора на 1%.

ВЫВОДЫ

По полученным результатам можно сделать вывод, что метод Циглера-Николса не учитывает требования к запасу устойчивости системы, что является его главным недостатком. После расчёта параметров регулятора требуется его ручная подстройка для улучшения качества регулирования.

Преимуществом данного метода является простота использования. На практике метод Циглера-Николса чаще всего используется для генерации начальных приближений параметров, которые затем уточняются методами оптимизации [7–10].

ЛИТЕРАТУРА

- [1] Денисенко В.В. ПИД-регуляторы: принципы построения и модификации. СТА. – 2006. – №4 (45). URL: <http://www.cta.ru/cms/f/342946.pdf>.
- [2] Динамика мехатронных систем. Жмудь В.А., Французова Г.А., Востриков А.С. Учебное пособие / Новосибирск, 2014.
- [3] Цифровые регуляторы: целевые функции настройки, выбор метода интегрирования, аппаратная реализация. Васильев В.А., Воевода А.А., Жмудь В.А., Хассуонех В.А. Сборник научных трудов Новосибирского государственного технического университета. 2006. № 4 (46). С. 3-10.
- [4] Французова Г.А. Основы теории управления: учебно-методическое пособие. Г.А. Французова, Г.В. Саблина. Новосибирск: Изд-во НГТУ, 2016. – 63 с.
- [5] Востриков А.С. Основы теории непрерывных и дискретных систем регулирования. – 5-е изд., перераб. и доп.: учеб. пособие / А.С. Востриков, Г.А. Французова, Е.Б. Гаврилов. Новосибирск: Изд-во НГТУ, 2008. – 476 с.
- [6] Вадутов О.С. Настройка типовых регуляторов по методу Циглера-Николса: учебно-методическое пособие. Томск: Изд-во Томского политехнического университета, 2014. – 10 с.
- [7] Use of bypass channel for feedback control of oscillatory object well-known as difficult one for control / V. A. Zhmud, G. V. Sablina, V. G. Trubin, L. V. Dimitrov. International Siberian conference on control and communications (SIBCON) : proc., Moscow, 12-14 May 2016. – Moscow : IEEE, 2016. – 6 p.
- [8] Calculation of regulators for the problems of mechatronics by means of the numerical optimization method / Zhmud, V., Dimitrov, L., Yadrishnikov, O. 20.15.2014 12th International Conference on Actual Problems of Electronic Instrument Engineering, APEIE 2014 – Proceedings 7040784, p. 739–744.
- [9] Detection of unrevealed non-linearities in the layout of the balancing robot / A. Y. Ivoilov, V. A. Zhmud, V. G. Trubin, L. V. Dimitrov. International Siberian conference on control and communications (SIBCON): proc., Moscow, 12-14 May 2016. – Moscow : IEEE, 2016. – 9 p.
- [10] Modern key technologies in automatics: structures and numerical optimization of regulators. Zhmud V., Yadrishnikov O., Poloshchuk A., Zavorin A. В сб.: Proceedings - 2012 7th International Forum on Strategic Technology, IFOST 2012 2012. С. 6357804.



Владислав Юрьевич Воробьев, магистрант каф. Автоматики НГТУ.
E-mail: vladnsk.1995@mail.ru

Новосибирск, 630073,
просп. К. Маркса, д. 20,
НГТУ



Галина Владимировна Саблина, к.т.н, доцент каф. Автоматики НГТУ. Автор и соавтор более 40 научных и методических работ.
E-mail: sablina@corp.nstu.ru

Новосибирск, 630073,
просп. К. Маркса, д. 20,
НГТУ

Статья поступила 28.01.2019

Calculation and Optimization of Parameters of the Discrete PID-controller by the Ziegler-Nichols Method

Vlavislav Yu. Vorobyov, Galina V. Sablina

Novosibirsk State Technical University, Novosibirsk, Russia

Abstract: This article is devoted to obtaining of discrete models of continuous PID controllers, as well as the study of one of methods of automatic calculation and adjustment of controller parameters - the Ziegler-Nichols method. The parameters of the discrete PID controller will be calculated by the Ziegler-Nichols method, and systems with discrete PID controllers calculated by this method for a third-order object will be simulated and optimized. The simulation will be carried out using the Matlab software environment and the Simulink library. For the study, a continuous object of the third order is used.

Key words: PID-controller, Ziegler-Nichols method, Matlab Simulink, quality of the transition process, robustness.

- [1] Denisenko V.V. PID – regulatori: principi postroitiya i modifikaciyi // STA. 2006. №4 (45). URL: <http://www.cta.ru/cms/f/342946.pdf>.
- [2] Dinamika mekhatronnykh sistem. Zhmud' V.A., Frantsuzova G.A., Vostrikov A.S. Uchebnoye posobiye / Novosibirsk, 2014. [3] Tsifrovyye regulatory: tselevyye funktsii nastroyki, vybor metoda integrirovaniya, apparatnaya realizatsiya. Vasil'yev V.A., Voyevoda A.A., Zhmud' V.A., Khassuonekh V.A. Sbornik nauchnykh trudov Novosibirskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta. 2006. № 4 (46). S. 3-10.
- [3] Frantsuzova G.A. Osnovi teorii upravleniya: uchebno-metodicheskoye posobiye/ G.A. Frantsuzova, G.V. Sablina. – Novosibirsk: NGTU, 2016. – 63 s.
- [4] Vostikov A.S. Osnovi teorii neprerivnykh i disretnikh sistem regulirovaniya: uchebnoye posobiye / A.S. Vosrikov, G.A. Frantsuzova, Gavrivov E.B. – Novosibirsk: NGTU, 2008. – 476 s.
- [5] Vadutov O.S. Nastoyka tipovikh regulatorov po metodu Ziglera – Nikolsa: uchebno-metodicheskoye posobiye. – Tomsk: TPU, 2014. – 10 s.
- [6] Use of bypass channel for feedback control of oscillatory object well-known as difficult one for control / V. A. Zhmud, G. V. Sablina, V. G. Trubin, L.

- V. Dimitrov. International Siberian conference on control and communications (SIBCON): proc., Moscow, 12–14 May 2016. – Moscow : IEEE, 2016. – 6 p.
- [7] Calculation of regulators for the problems of mechatronics by means of the numerical optimization method / Zhmud, V., Dimitrov, L., Yadrishnikov, O. 20.15.2014 12th International Conference on Actual Problems of Electronic Instrument Engineering, APEIE 2014 – Proceedings 7040784, p. 739–744.
- [8] Detection of unrevealed non-linearities in the layout of the balancing robot / A. Y. Ivoilov, V. A. Zhmud, V. G. Trubin, L. V. Dimitrov. International Siberian conference on control and communications (SIBCON): proc., Moscow, 12-14 May 2016. – Moscow : IEEE, 2016. – 9 p.
- [9] Modern key technologies in automatics: structures and numerical optimization of regulators. Zhmud V., Yadrishnikov O., Poloshchuk A., Zavorin A. В сб.: Proceedings - 2012 7th International Forum on Strategic Technology, IFOST 2012 2012. С. 6357804.



Vladislav Yu. Vorobyov, student of the 2nd year of the master's program of the Automation Department of the NSTU.

E-mail: vladnsk.1995@mail.ru

Novosibirsk, 630073, str. Prosp. K. Marksa, h. 20, NSTU



Galina V. Sablina, Candidate of Technical Sciences, Associate Professor of the Department of Automation of NSTU. Author of more than 40 scientific publications.

E-mail: sablina@corp.nstu.ru

Novosibirsk, 630073, str. Prosp. K. Marksa, h. 20, NSTU

The paper was received on 28.01.2019.